随钻密度中子一体化中的伽马影响因素分析

陈均燕[1] 范继林[1] 张琼[1] 袁伟[2]
1（电子科技大学 自动化工程学院 成都 610000）
2（中海油服油田技术研究院 燕郊 065201）

摘要 由于传统中子和密度测量仪器的独立性，为提高地层信息的安全性和效率，针对已有中子和密度仪器进行一体化设计，以合并中子密度部分，并详细分析一体化设计中的伽马影响因素。为了深入研究中子和伽马源之间的距离对探测器测量的影响，利用蒙特卡罗模拟，分析不同中子和伽马源距离下的探测器计数和能谱，并在不同岩性和密度情况下验证其正确性。研究结果表明，保持真实仪器源距、中子源强等参数不变，在中子和伽马源相距 410mm 的情况下，中子辐射场对密度测量结果没有显著影响，反演密度误差均小于 0.015g/cm^3。由于同类放射源可能具有不同源强，会对仪器准确的测量产生影响，在进行一体化设计时对中子放射源源强影响进行了评估，推导出中子源源强与两源之间的最佳距离的数值模型，可以对现场仪器测试进行快速性能评估，并对一体化设计进行理论的指导。

关键词 随钻密度中子一体化，中子辐射场，蒙特卡罗方法
中图分类号 O571.42
DOI:

Analysis of Gamma Influencing Factors in Neutron Gamma Integration with Drilling

CHEN Junyan[1] FAN Jilin[1] ZHANG Qiong[1] YUAN Wei[2]
1(*School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610000, China*)
2 (China Oilfield Services Limited,Yanjiao 065201,China)

Abstract [Background] Due to the independence of traditional neutron and density measurement instruments, in order to improve the safety and efficiency of geological information.[Purpose]Integrate the design of existing neutron and density instruments to merge the neutron density components And analyze in detail the gamma influencing factors in integrated design.[Methods] In order to investigate the influence of the distance between neutron and gamma sources on detector measurements, Monte Carlo simulation was used to analyze detector counts and energy spectra at different distances between neutron and gamma sources, and the results were validated under different rock and density conditions.[Results] Keeping the true instrument source distance, neutron source intensity and other parameters unchanged, the neutron radiation field has no significant impact on the density measurement results when the neutron and gamma sources are 410mm apart, and the absolute error of the inversion density is less than 0.015g/cm3. By changing the neutron source intensity to explore the impact of source intensity on integrated research, and simulating multiple neutron sources with different intensities, it can be found that as the neutron source intensity gradually increases, the optimal distance between the neutron source and gamma source gradually increases and presents a quadratic function relationship.[Conclusions] Based on such findings, the distance between the two sources can be flexibly determined based on the strength of the neutron source, enabling rapid performance evaluation of on-site instrument testing and providing theoretical guidance for integrated design.

基金名称项目(U23B20151 和 52171253) 资助
第一作者：陈均燕，女，2002 年出生，2023 年毕业于西华大学，现为硕士研究生，研究领域为密度测井
通讯作者：张琼，E-mail: zhangqio@uestc.edu.cn
收稿日期：20XX-00-00，修回日期：20XX-00-00

Keywords Neutron porosity, Gamma density, Integration measurement

在油气勘探和开发中，获得准确的地层参数和流体信息对于评价储层的产能潜力至关重要。传统的测井方法中，密度测井和中子测井是常用的技术手段，它们分别提供了地层密度和孔隙度等重要参数。然而，这些传统方法在一定程度上存在着成本较高、数据解释相对复杂等挑战。为了克服这些限制，并提高测井技术的效率和精度，近年来随钻密度中子一体化设计逐渐受到重视。这种一体化设计将密度测井和中子测井集成在同一根仪器上，有效地综合了两种测量方法的优势，不仅可以降低仪器设计成本，而且在钻井过程中提供了更为全面和精准的地层信息。

国外已经推出了一些采用一体化设计的核测井仪器，其中包括斯伦贝谢公司的ADN[2](Azimuthal Density-Neutron Tool)和 oliden的Lithofusion[3]。这些仪器都是新一代随钻测井技术产品，采用放射性化学源来实现地层密度和中子测量的集成。ADN 仪器将中子测量部分置于仪器上部，而密度测量部分则位于其下部，中子密度源通过载体连接，使得仪器更加集成化。在钻井过程中，ADN 可以提供多方位实时视中子孔隙度、地层体积密度及光电吸收指数测量，描述地层岩性及孔隙度特征。另一方面，Lithofusion 则是一种随钻测井仪器，其密度测量部分位于仪器底部，而源则位于探测器的上部，中子测量部分位于密度测量部分之上，探测器则位于源的下方，两部分相距较远，这种组合方式有效防止了中子作用产生的次生伽马对密度测量的影响。这些仪器采用先进的技术，能够同时测量中子和伽马射线，从而提供更准确、更全面的地层信息。

然而在中子和密度一体化设计的研究中，中子辐射场对密度测量的影响成为一个值得关注的问题。中子源发射中子的过程中，中子会与地层中的原子核发生反应，产生伽马射线，这些中子产生的次生伽马可能会被伽马探测器接收到，误认为是来自地层反应产生的伽马射线，这对于密度测量会构成干扰。因此需要进一步研究，以确保中子辐射场对密度测量的影响最小化，这项研究的重要性在于提高核测井技术的精确性和可靠性，为油气勘探和开发提供更为可靠的数据支持。

1 伽马辐射场产生原理

在地层中，伽马化学源所释放出的伽马射线与地层物质的相互作用主要是光电效应、康普顿效应和电子对效应。在不同的能量范围内，发生的主要反应不同，然而由于实际测井过程中所用的伽马射线的能量远远大于 0.1MeV，也就是说，在测井中，主要考虑光电效应和康普顿散射。对于伽马光子经地层衰减，最后由探测器接收，这部分反应可用以下公式[5]表示：

$$\phi_1 = \phi_0 e^{R\mu n} \tag{1}$$

其中$\varnothing_1$表示伽马源伽马辐射场，$\varnothing_0$表示穿过地层物质前的伽马辐射场，u_n表康普顿效应和光电效应，R 表示从伽马射线产生到被探测器接收这一路径的距离。

中子化学源使用放射性同位素（如 ^{241}Am-Be、^{252}Cf）产生中子辐射，在发射后一定时间内中子与井眼周围环境中不同元素的原子核发生非弹性散射、弹性散射和俘获反应。非弹性散射伽马射线和俘获伽马射线均会与地层介质发生吸收作用而衰减，最后到达探测器被吸收。所以次生伽马场分布在一定程度上可以看作是次生非弹性散射伽马场分布和俘获伽马场分布以及伽马衰减作用的耦合。

根据中子扩散理论[6-7]：

$$S + D\nabla^2\phi - \Sigma_a\phi = 0 \tag{2}$$

式中，介质的宏观俘获截面为$\sum_a$，中子源单位时间单位体积内吸收的中子数为 S，扩散系数为 D，Φ是与空间坐标有关的函数。

再由双群扩散理论，可得出

快群中子通量：

$$\phi_e(r) = \frac{Se^{-\frac{r}{L_e}}}{4\pi D_e r} \tag{3}$$

热群中子通量：

$$\phi_t(r) = \frac{SL_t^2}{4\pi D_t(L_e^2 - L_t^2)}\left(\frac{e^{-\frac{r}{L_e}}}{r} - \frac{e^{-\frac{r}{L_t}}}{r}\right) \tag{4}$$

通过上述分析可以得出在一定空间范围内的

总伽马光子通量：

$$\phi_\gamma(R) = \phi_e(r_1)e^{|R-r_1|\mu m} + \phi_t(r_2)e^{|R-r_2|\mu m} + \phi_0 e^{R\mu n} \tag{5}$$

其中，u_m表示康普顿效应、光电效应和电子对效应，u_n表示康普顿效应和光电效应。

由于伽马化学源是通过划分能量范围利用分窗方法进行密度计算的，而中子产生的次生伽马光子又与康普顿散射产生的光子不同，不能进行分窗验证和计算。但是在辐射场空间范围内这两

部分粒子会出现重叠现象，探测器也会同时对中子产生的伽马粒子进行收集，会对密度测量造成干扰，所以需要消除这一部分伽马光子的作用。

由式 5 可以看出，中子源产生次生伽马与中子源源强和探测距离有关。为了在仪器设计时考虑并消除这一部分的影响，进行实验研究，调整两个放射性源之间的距离观察探测现象。通过不同距离下的辐射测量，我们能够观察到辐射在空间中的衰减规律，从而推断出辐射源的辐射范围。然而放射性源的源强也直接影响其辐射范围和辐射粒子在介质中的传播，较高的源强通常导致更广泛的辐射范围，而粒子传播范围也随之增加。这一关联性意味着实验中调整源强，可有效探究源与目标之间的辐射影响，为仪器设计提供了重要的信息所以，总的来说可以通过探究源强和两源之间的距离，来进行仪器性能评估，从而得到符合预期的参数设置。

2 仪器蒙特卡罗模型建立

建模仪器参考现有中子密度一体化仪器，保留原有仪器的源距以及探测器尺寸等信息，在研究中只修改中子源和伽马源之间的距离，图 1 为本次研究所涉及仪器结构。研究采用蒙特卡罗方法进行模拟实验，通过 Geant4 软件进行模型建立。仿真模型主要分为中子探测和密度探测两个部分，其中密度探测部分包括出射角度为 45° 的 ^{137}Cs 源、晶体尺寸为 ø21.6mm*57.25mm 的远源距伽马探测器和晶体尺寸为 ø21.6mm*19.2mm 的近源距伽马探测器，中子探测器部分包括一个 AmBe 源、一个尺寸为 ø19.05mm*117.5mm 近源 He_3 中子探测器和两个尺寸为 ø19.05mm*168.58mm 远源 He_3 中子探测器，探测器源距对应参数如表 1 所示。

表 1 探测器源距

Table 1 Detector Source Distance

探测器 Detector	源距/mm Source distance/mm
近中子探测器 Near neutron detector	137.64
远中子探测器 Far neutron detector	514.33
近密度探测器 Near density detector	201.612
远密度探测器 Far density detector	422.13

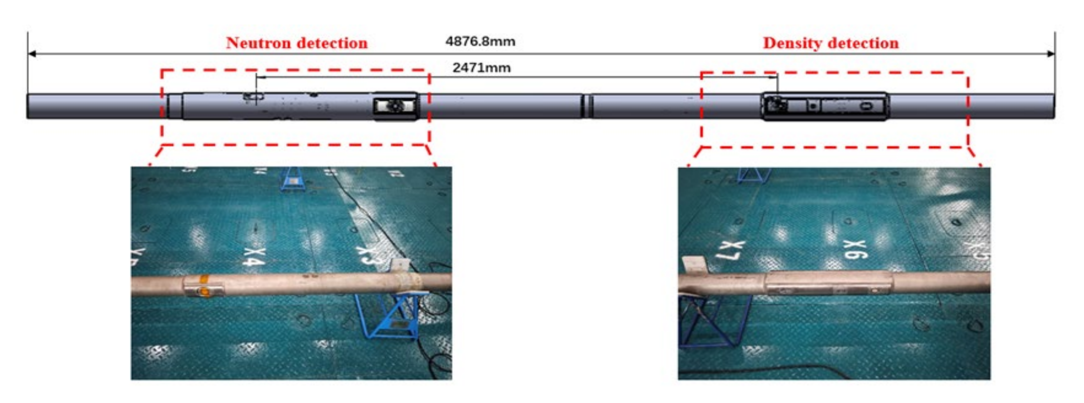
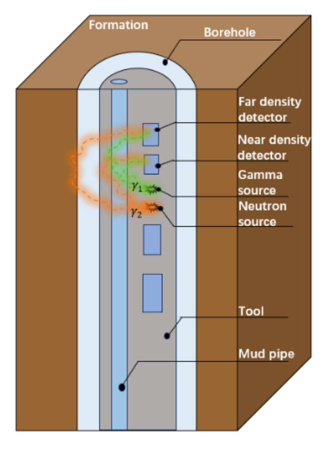


图 1 仪器结构（左为中子部分，右为密度部分）

Fig.1 Tool structure (neutron section on the left and density section on the right)

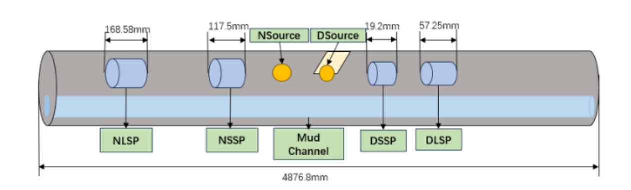
三个中子探测器均采用管气体探测器，两个伽马探测器采用 NaI 晶体。伽马探测器外围包裹着钨合金，起到对放射性粒子的屏蔽作用。通过铍窗使伽马粒子进入探测器内部。在中子探测部分，为得到准确的中子计数和中子计数比，使用两个远源中子探测器并排放置。

基于 Geant4 搭建中子密度一体化仪器基本模型示意图如图 2 所示，在模拟中保持各探测器和相应化学源之间的距离不变，通过固定中子源，移动密度源位置探究中子源和伽马源之间的距离对密度测量的影响。测量标准环境为 6in 的井眼，内部充满水，岩性为灰岩，孔隙度为 20%。



(a) 测井基本模型示意图

(a) Diagram of basic logging model



(b) 仪器基本示意图

(b) Diagram of the tool

图 2　中子密度一体化仪器基本模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of the basic model of the integrated neutron density tool

进行仿真实验时，最关键的是确定仪器中伽马源和中子源的设置，仪器的源为 Geant4 工具包中的 GPS（General Particle Source）类定义的标准 Am-Be 源和 Cs-137 源，在主程序中创建 GPS 类的实例，并设置 Am-Be 中子源和 ^{137}Cs 伽马源参数，包括发射能量，位置等，其中 Am-Be 中子源强为 8 居里，^{137}Cs 伽马源强为 1.7 居里，发射能量为 0.662MeV 伽马粒子，在 run.mac 文件中设置源放射粒子数。由于在一体化设计中伽马源和中子源的源强约 4.7 倍关系，为了确定蒙特卡洛模拟所需的粒子数，在标准环境下对伽马粒子数进行计数收敛实验，对于结果引入 FOM 因子，综合考虑模型的运行时间和统计误差，权衡仿真效率。具体结果如表 2 所示，通过实验可以确定伽马源发射粒子数为 $2*10^9$ 情况下，可以达到最优的仿真效率，但在实际工程中进行模拟与实测匹配时，考虑到蒙特卡罗统计误差的原因，为了得到更加精确的模拟结果，在最终模拟中确定伽马源发射粒子数为 $4*10^9$，确定了伽马粒子数后，根据源强倍数关系可确定中子源发射粒子数为 $1.88*10^{10}$。在仿照刻度井环境中进行模拟时，使用灵敏探测器记录接收到的粒子数，最后就可以通过模拟所得的数据结果进行实验评估，为实际设计提供可靠依据。

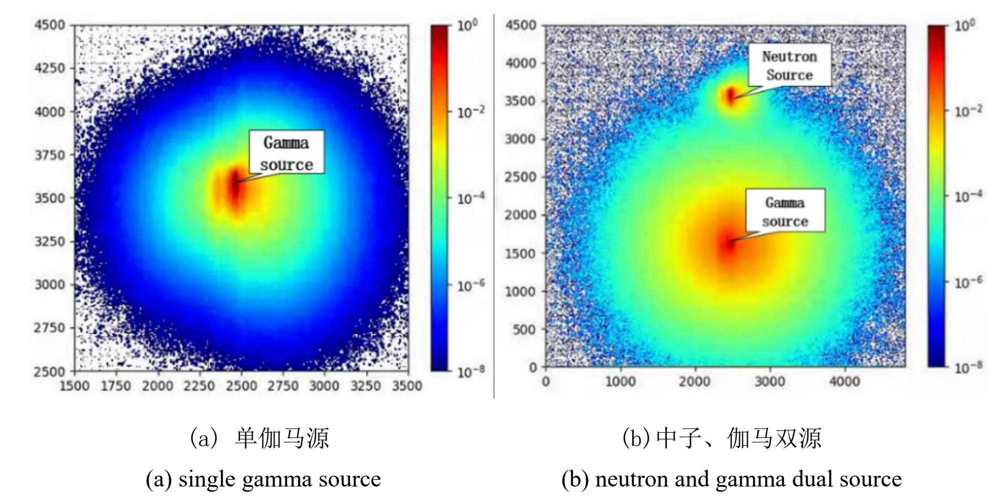
表 2　伽马源蒙特卡罗收敛性计算

Table 2 Monte Carlo Convergence Calculation for Gamma Sources

粒子数 Number of particles	近密度探测器 Near density detector	远密度探测器 Far density detector	统计误差 error	时间 min Time min	FOM
$5*10^8$	1111	490	0.05423	5.562099703	61.13361
$1.5*10^9$	3302	1508	0.03108	10.98998126	94.19685
$2*10^9$	4355	2062	0.026732	14.80417735	94.52801
$3*10^9$	6515	2975	0.022128	250.5994561	8.149952
$4*10^9$	8858	4033	0.018996	419.1931701	6.610938

在 Geant4 中模拟地层中单独伽马源产生伽马光子以及双源同时存在伽马光子的分布情况，图中距离放射性源越近，粒子密度越高，反之，粒子密度越低。图 3 左图模拟粒子数为 $1*10^8$,而右图模拟中子源和伽马源相距 1250mm 距离，发射粒子数为 $1*10^6$ 就已经可以看出在此范围内伽马粒子和次生伽马粒子出现了明显的重叠和交叉现象，说明了纯密度源辐射场和中子次生伽马辐射场之间的相互影响。值得关注的是，一旦次生伽马粒子被伽马探测器所探测，则可能造成探测器计数错误。这是因为伽马粒子会与探测器材料作用，产生次级粒子，这些次级粒子在探测器中传播并引起能量沉积，为了准确记录这一能量沉积过程，灵敏探测器将探测到的粒子的沉积能量记录在 energyDeposit 变量中，当 energyDeposit 大于 0 时，表明 NaI 探测器中探测到了伽马粒子进入，从而使探测器计数值加 1，然而由中子产生的次生伽马粒子并非真实经过地层反应过后的伽马粒子，这

种情况造成了探测器计数的错误，从而将直接影响密度测量的准确性，所以需要考虑中子源与密度探测器之间的距离影响。



(a) 单伽马源　　(b) 中子、伽马双源

(a) single gamma source　　(b) neutron and gamma dual source

图 3 仿真模拟伽马粒子分布图

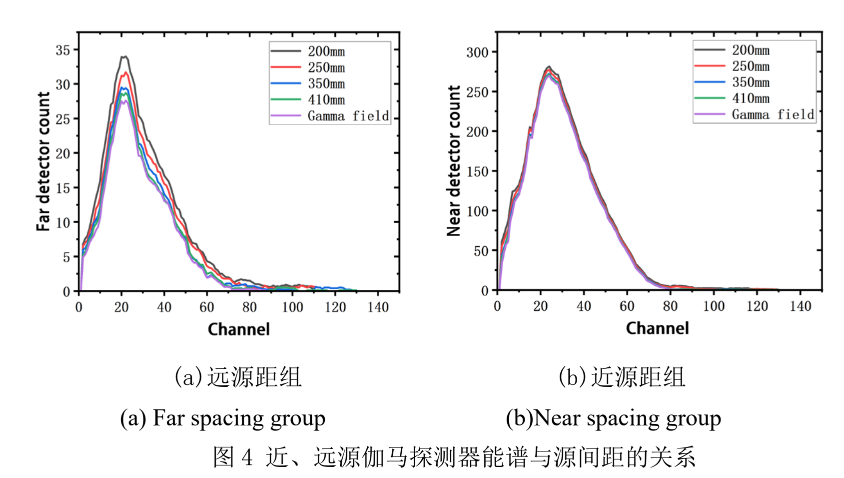
Fig.3 Gamma particle distribution diagram for simulation

3　中子源和伽马源距离对密度探测性能影响

一体化仪器综合中子源和伽马源，并将其挂接，在实现仪器集成化的基础上，通过对中子和伽马源之间不同距离下的密度探测性能进行研究，从探测器计数和能谱两个角度出发，确定最佳距离，以消除中子源辐射场对密度探测性能的影响。

3.1　中子源和伽马源距离对伽马探测器的影响

在研究中子和伽马源间距对密度探测性能的影响时，需要关注辐射场的变化，理论上，随着源间距的改变，伽马探测器所获得的能谱形状会发生一定的变化。因此，通过分析中子和伽马源距离对伽马探测器能谱影响的具体变化，从而为最佳的源间距离确定提供依据。实验主要对辐射叠加谱与纯伽马能谱进行了比较分析，辐射叠加谱是指同时存在中子和伽马源时的能谱，而纯伽马能谱则是在无中子源的情况下测得的。从图 4 可知在 200mm-410mm 源间距范围内，远源探测器能谱对源间距变化敏感，而源间距变化对近源探测器能谱影响几乎可以忽略，当中子和伽马源距离为 410mm 时近远源伽马探测器叠加谱基本与纯伽马谱重合。



(a) 远源距组　　(b) 近源距组

(a) Far spacing group　　(b)Near spacing group

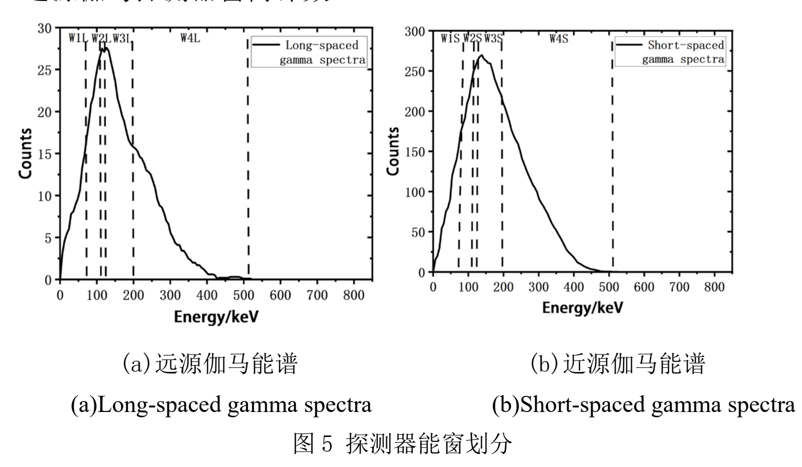
图 4 近、远源伽马探测器能谱与源间距的关系

Fig.4 Relationship between energy spectrum and source distance of near and far source gamma detectors

由于求解的地层参数与探测器计数具有非线性关系，因此使用最大互信息系数（MIC）方法去评估地层参数与探测器每一能量道址计数之间的非线性关系，基于此划分的能量窗口可以更好地反映仪器特性，结合真实仪器要求以及相关性系数窗口划分如图 5 和表 3 所示。其中 W1 窗为岩性窗，W4 窗为密度窗，岩性窗通常用于岩性探测，而密度窗则专注于获取地层密度。因此，需要评估

源间距对岩性窗和密度窗计数的影响，在此处研究中主要考虑的是辐射叠加计数与纯伽马源计数之间的关系。

从图 6 可见，近、远源伽马探测器窗内计数随着源间距的增加逐渐减少，最终趋于平衡，结合上述研究确定当源间距 410mm 时，辐射叠加伽马探测器窗内计数与纯伽马源窗内计数基本重合。



(a) 远源伽马能谱　　(b) 近源伽马能谱

(a)Long-spaced gamma spectra　　(b)Short-spaced gamma spectra

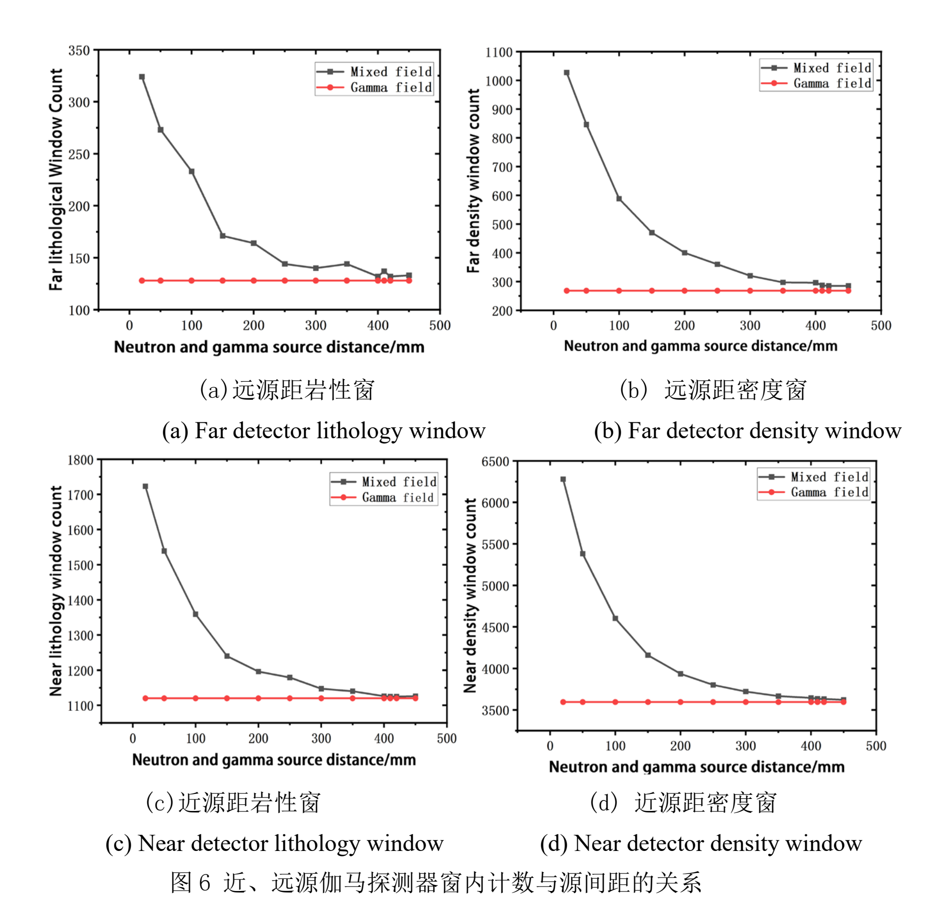
图 5 探测器能窗划分

Fig.5 Energy window division of detectors

表 3 探测器能窗划分

Table3 Detectors energy window division

能窗 Energy window	W1S/W1L	W2S/W2L	W3S/W3L	W4S/W4L
能量范围/KeV Energy range/KeV	75-110	110-120	120-200	200-520



(a) 远源距岩性窗　　(b) 远源距密度窗

(a) Far detector lithology window　　(b) Far detector density window

(c) 近源距岩性窗　　(d) 近源距密度窗

(c) Near detector lithology window　　(d) Near detector density window

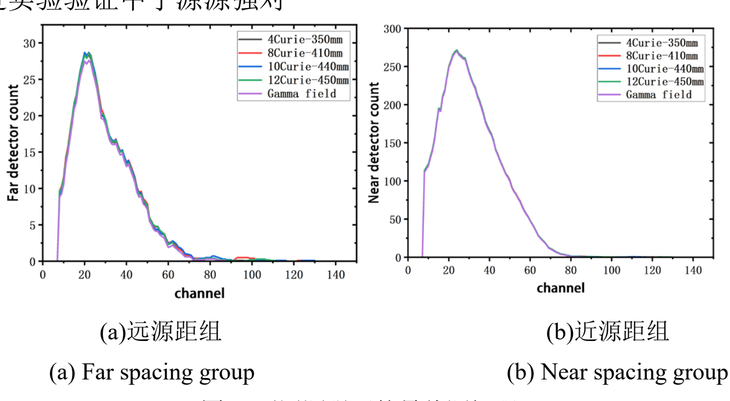
图 6 近、远源伽马探测器窗内计数与源间距的关系

Fig.6 Relationship between in-window counting and source distance of near and far source gamma detectors

3.2　中子源源强对源间距的影响

源强是衡量放射源的放射性强度的物理量，高源强中子源有更高的辐射水平，更强的穿透能力，可以增强探测器计数率，而低源强中子源则刚好相反，在减小辐射能力同时，也将大大减少操作人员所受辐射的伤害，使测井操作更加安全可靠。在进行中子伽马辐射场研究时，中子源强度也会对中子源和伽马源之间的距离评估造成影响。在蒙卡模拟中，保持中子源能量不变，更改中子源源强，中子源源强选择分别为 4 居里、8 居里、10 居里和 12 居里，在 Geant4 模拟中通过改变粒子数进行实现，模拟粒子数分别为 0.5*10^8、1*10^8 、1.25*10^8 和 1.5*10^8，通过实验验证中子源源强对中子伽马源之间的距离的影响，确保增加源强和减小源强后，其测量精度不变。

从图 7 可以看出，当中子源源强从 4 居里到 12 居里增强时，中子源和伽马源之间最佳源间距也随之增加，中子源源强为 4 居里时，两源之间相隔 350mm 对于密度测量最佳；中子源源强为 8 居里时，两源之间相隔 410mm 对于密度测量最佳；中子源源强为 10 居里时，两源之间相隔 440mm 对于密度测量最佳；中子源源强为 12 居里时，两源之间相隔 450mm 对于密度测量最佳，两源处于最佳距离的情况，可以消除中子源产生的次生伽马粒子对密度测量的影响。



(a)远源距组　　(b)近源距组

(a) Far spacing group　　(b) Near spacing group

图 7　不同源强下的最佳源间距

Fig.7 Optimal source spacing under different source intensities

源强与辐射范围之间的关系是一个复杂的问题，需要考虑多种因素。通常情况下，源强较大的放射性源在较短的距离内会产生较高的辐射强度，但随着距离的增加，辐射范围会迅速减小。源强与辐射范围是否存在曲线拟合关系则取决于具体的实际情况和辐射传播的复杂性。在本次研究环境下，通过实验和数值模拟，可以更准确地了解源强与辐射范围之间的关系，并进行了曲线拟合，得到如图 8 所示的拟合关系。

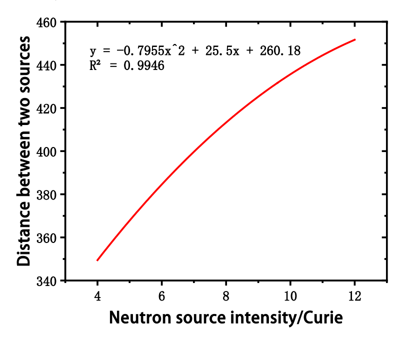


图 8　源强与两源间距的拟合关系

Fig.8 Fitting relationship between source intensity and distance between two sources

从拟合曲线可以看出，中子源源强与中子、伽马源之间的距离成二次函数关系。在当前仪器设计中，若更改中子源源强，由已知曲线关系，可以快速确定两源间的间距，确保中子源次生伽马辐射场对密度探测没有影响。

3.3　确定源间距

结合上述实验结果，保持现有仪器参数，在固有中子源源强为 8 居里条件下，可以确定在中子、密度源相距 410mm 时，中子辐射对密度测量影响几乎为零，使得伽马探测器能够准确地捕捉到纯伽马射线，而不会受到中子辐射的显著影响。因此，选取 410mm 的源间距为最佳选择。

4　结果验证

4.1　不同岩性

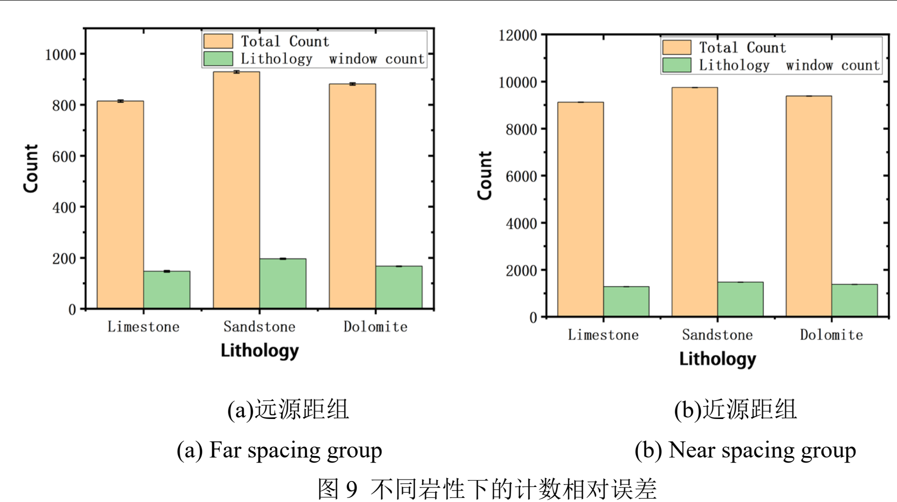
岩性对密度探测有着显著的影响，主要是由于不同岩性的物理特性导致了对辐射的不同散射和吸收行为，从而对伽马探测器的计数产生不同

程度的影响。因此，在确定了源间距后，需要进一步验证在此间距下，不同岩性对密度测量的影响。在模拟时，主要考虑了灰岩、砂岩和白云岩三种岩石，其密度分别为 2.697g/cm^3、2.65 g/cm^3、2.86 g/cm^3。通过对不同岩性下的数据模拟，如表 4 和图 9、10 数据对比所示，在三种不同岩性下，叠加辐射场、纯伽马场探测器计数和岩性窗内计数相对误差均小于 5%，且探测器能谱可以做到完全匹配，说明在各种岩性条件下，410mm 的放射源距离可以满足设计要求，获得纯净伽马射线。

表 4 不同岩性下叠加辐射场、纯伽马场近、远源距探测器计数和岩性窗内计数相对误差

Table 4 Relative errors in the counting of stacked radiation fields, pure gamma fields near and far source distance detectors, and counting within the lithology window under different rock types

岩性 Lithology	SSP 相对误差 SSP Relative errors		LSP 相对误差 LSP Relative errors	
	总计数 Total Count	岩性窗计数 Lithology window count	总计数 Total Count	岩性窗计数 Lithology window count
灰岩 Limestone	0.64%	0.48%	4.37%	3.30%
砂岩 Sandstone	0.72%	0.50%	4.98%	2.40%
白云岩 Dolomite	0.84%	0.62%	4.25%	0.97%



(a)远源距组

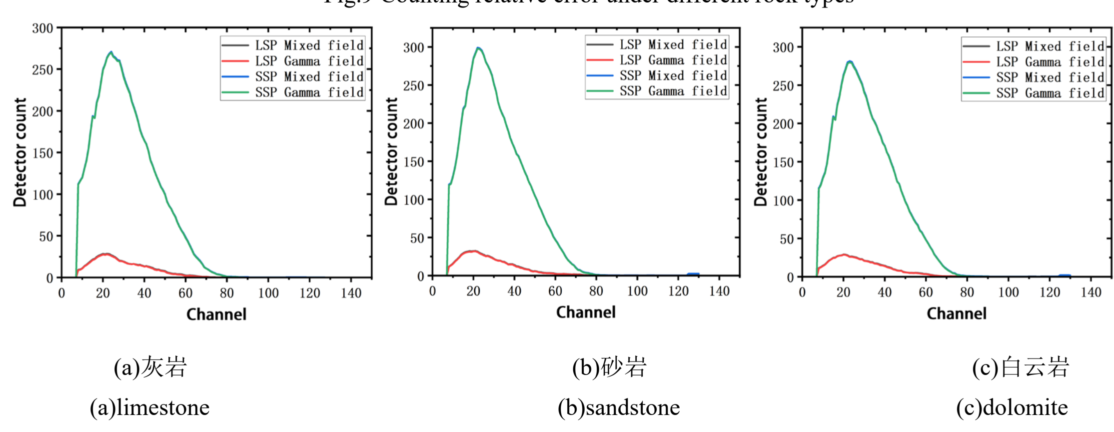
(a) Far spacing group

(b)近源距组

(b) Near spacing group

图 9 不同岩性下的计数相对误差

Fig.9 Counting relative error under different rock types



(a)灰岩 (a)limestone

(b)砂岩 (b)sandstone

(c)白云岩 (c)dolomite

图 10 不同岩性下叠加能谱和纯伽马能谱对比

Fig.10 Comparison of stacked energy spectra and pure gamma energy spectra under different rock types

4.2 不同密度

在确定了两源间的最佳源间距后，还需要验证在不同地层密度下的结果。在这部分验证中，主要通过改变地层孔隙度来改变地层密度，同样保持井眼、仪器等参数完全不变，改变地层孔隙度，其他地层条件相同，来模拟地层孔隙度为 20p.u.、

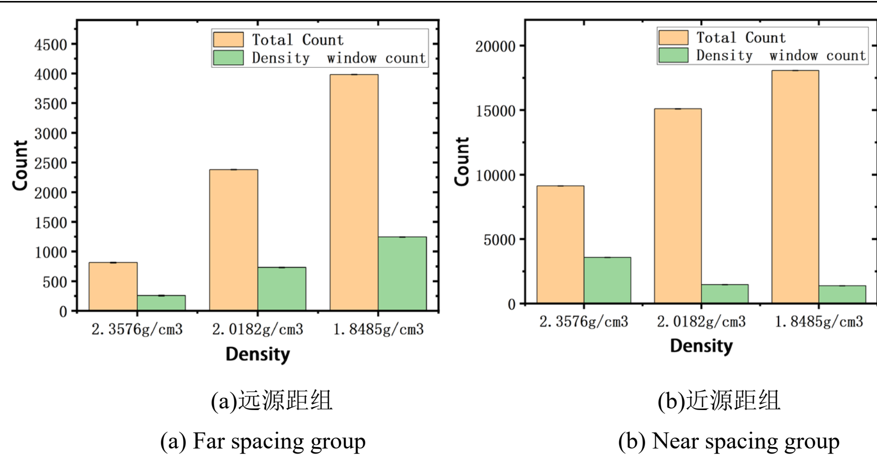
40p.u.、50p.u，对应地层密度分别为 2.3576g/cm^3、2.0182g/cm^3、1.8485g/cm^3 的地层环境。

通过表 5 和图 11 可以知道，不同地层密度下叠加辐射场、纯伽马场近、源远距探测器计数和密度窗内计数相对误差均小于 5%。从图 12 可以看出，不同地层密度下的探测器能谱也基本可以重合，以此验证 410mm 的放射源距离可以消除中子源次生伽马场的影响，使探测器接收到纯净伽马射线。

表 5 不同密度下叠加辐射场和纯伽马场近、源远距探测器计数和密度窗内计数相对误差

Table 5 Relative errors in counting and density window counting of near-field and far-field detectors with superimposed radiation fields and pure gamma fields at different densities

地层密度 g/cm3 Formation density g/cm3	SSP 相对误差 SSP Relative errors		LSP 相对误差 LSP Relative errors	
	总计数 Total Count	密度窗计数 Density Window Count	总计数 Total Count	密度窗计数 Density Window Count
2.3576	0.64%	0.68%	4.37%	4.95%
2.0182	0.51%	0.57%	1.62%	2.48%
1.8485	0.36%	0.34%	1.12%	1.45%



(a)远源距组

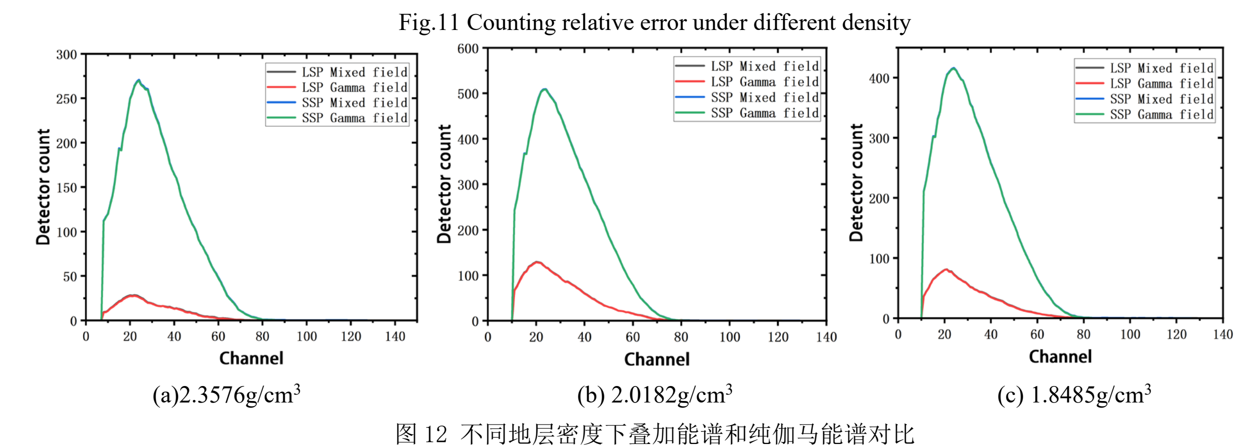
(a) Far spacing group

(b)近源距组

(b) Near spacing group

图 11 不同密度下的计数相对误差

Fig.11 Counting relative error under different density



(a)2.3576g/cm^3 (b) 2.0182g/cm^3 (c) 1.8485g/cm^3

图 12 不同地层密度下叠加能谱和纯伽马能谱对比

Fig.12 Comparison of stacked energy spectra and pure gamma energy spectra under different geological densities

4.3 实测验证

在进行实测验证阶段，需要进行刻度井数据获取以及模拟与实测数据的对比研究，刻度井是在试验基地人为建造的满足一定地层条件的测试井。本次选择了如图 13 所示的刻度井基地的密度标准井进行实验测量，将中子密度一体化仪器放入选取的刻度井中进行实测数据的采集，根据所选择的刻度井在 Geant4 软件进行刻度井环境的一比一构建，在构建过程中需要保证地层环境、井眼尺寸和仪器摆放位置的一致。

在本次实验中，选取了 2 口刻度井，部分刻度井信息见表 6 所示。在 Geant4 中按照 410mm 的中子源和伽马源距离模拟中子伽马一体化仪器在

刻度井环境中的测量，同时进行中子源和伽马源数据模拟，记录每一个道址下的探测器计数，得到仪器在不同刻度井环境中的模拟数据。由于在实际刻度时，是分别安装中子源和伽马源进行中子和密度数据采集的，所以此时实测密度采集所获取的就是纯净伽马源放出的伽马辐射场数据，刚好符合本次探究预期。将模拟数据与实测数据进行结果对比，以此证明本次研究的正确性。模拟数据和实测数据能谱匹配情况见图 14 所示。

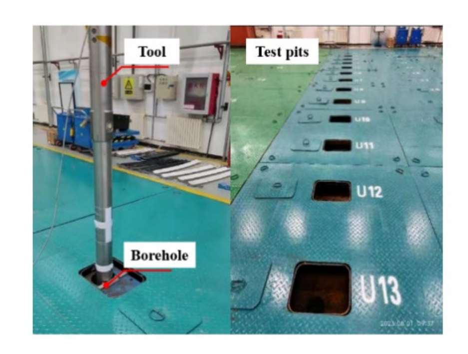


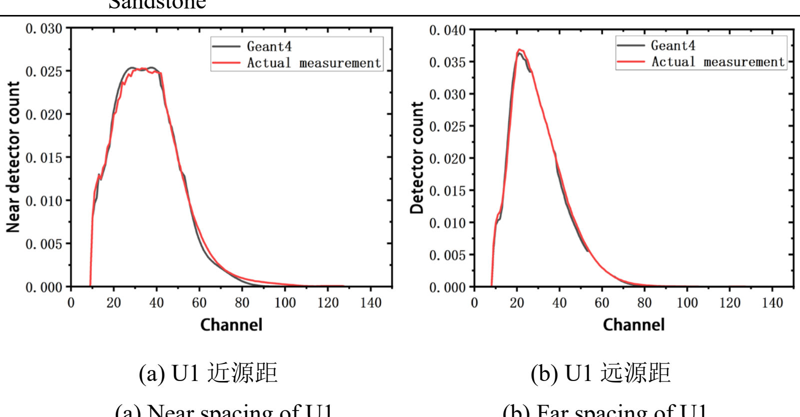
图 13 刻度井实验装置

Fig.13 Test pit experiment setup

表 6 刻度井信息

Table 6 Partial Scale Well Information

刻度井序号 Well number	岩性 Lithology	井眼直径/mm Well diameter/mm	密度 g/cm3 Density g/cm3
U1	灰岩 Limestone	152.4	1.506
U9	砂岩 Sandstone	152.4	2.345

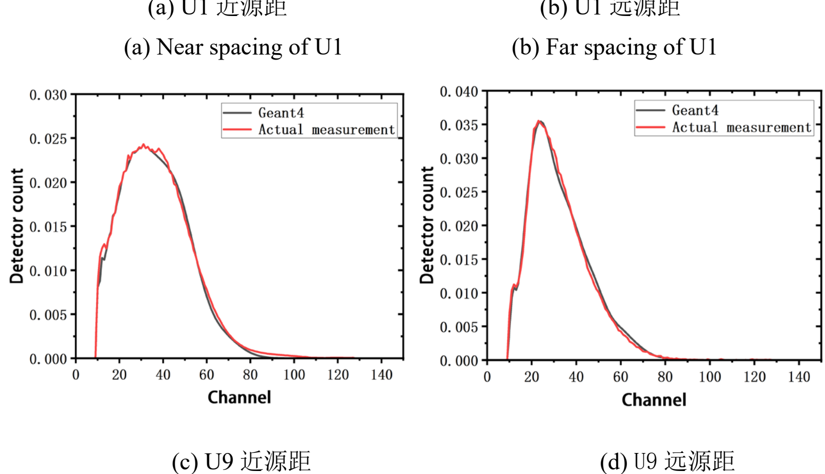


(a) U1 近源距

(a) Near spacing of U1

(b) U1 远源距

(b) Far spacing of U1



(c) U9 近源距

(c) Near spacing of U9

(d) U9 远源距

(d) Far spacing of U9

图 14 刻度井环境下叠加能谱和纯伽马能谱对比

Fig.14 Comparison of stacked energy spectrum and pure gamma energy spectrum in a calibrated well environment

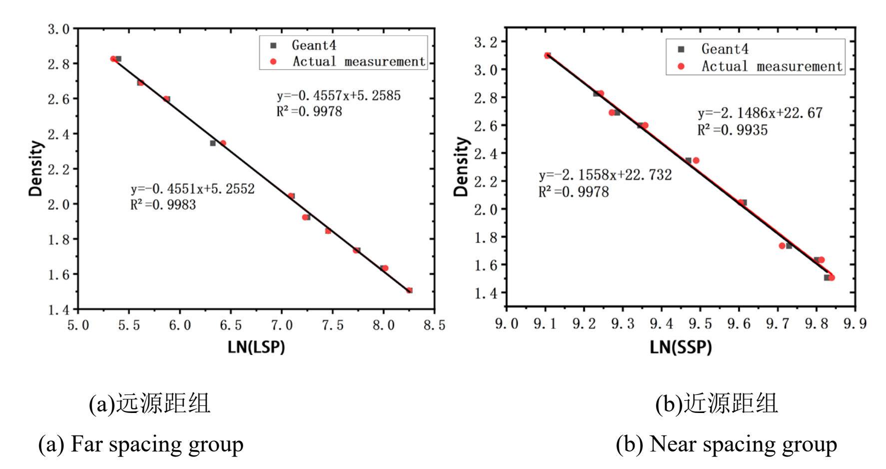
根据拟合结果，刻度井中模拟能谱与实测能谱具有较强的重合关系，最终确定中子伽马一体化仪器仿真模型的正确性，可以正确的反映地层信息，且密度测量不受中子源辐射场的影响。为了进一步评价刻度井中模拟数据的精确性，验证在一体化模型中，伽马探测器可探测到纯净的伽马射线，进行密度基础响应公式的拟合，拟合结果见图 15。

密度基础响应公式：

$$\rho_{LSP} = -0.4557\ln(LSP) + 5.2585 \quad (6)$$

$$\rho_{SSP} = -2.1486\ln(SSP) + 22.670 \quad (7)$$

对比上图模拟与仪器实测响应可得，Geant4模型模拟结果与实测结果的密度响应曲线相关性均大于 0.9900，且曲线基本重合，到达了较好的匹配效果。由上面基础响应公式可以将实验获得近远源距探测器计数带入上式，反演获得地层密度值，数据如表 7 所示。



(a)远源距组　　(b)近源距组

(a) Far spacing group　　(b) Near spacing group

图 15 实测与仿真基础响应公式拟合

Fig.15 Fitting of Basic Response Formulas for Actual Measurement and Simulation

表 7 真实地层密度和反演视密度的误差

Table7 Error of Real Formation Density and Inverted Apparent Density

刻度井序号 Well number	地层密度 g/cm3 Formation density g/cm3	近源距探测器 Near detector		远源距探测器 Far detector	
		视密度 g/cm3 Density g/cm3	绝对偏差 g/cm3 Error g/cm3	视密度 g/cm3 Density g/cm3	绝对偏差 g/cm3 Error g/cm3
U1	1.734	1.738	0.004	1.741	0.007
U9	2.345	2.332	0.010	2.336	0.009

在叠加辐射场中，反演获得的地层视密度与地层真实密度绝对偏差均小于 0.015g/cm^3，满足误差要求。以上数据均可以证明当前的放射性源位置可以消除中子源辐射场对密度测量的影响。

5　结语

(1) 基于现有仪器，为实现一体化设计要求，确定了中子与伽马源之间的距离对密度测量的影响，通过研究发现，在原有中子源强 8 居里情况下，中子源与伽马源相距大约 410mm，可以消除中子次生伽马场的影响。

(2) 刻度井中，仪器探测器模拟计数和实测计数相对误差均小于 5%，达到了较好的匹配结果，密度基础响应公式拟合曲线基本重合，反演地层密度均小于 0. 015g/cm^3。

(3) 考虑中子源源强对于两源距离的影响，随着中子源源强的增强，两源距离逐渐增加，当源强为 4 居里时，两源最佳距离为 350mm；源强为 8 居里时，两源最佳距离为 410mm；源强为 12 居里时，两源最佳距离为 450mm。并且中子源源强与两源间距呈现二次函数关系。

(4) 由于现有研究基于真实仪器进行，仪器设计可以基于现有结论关系进行调整，为今后仪器设计提供了思路。

作者贡献声明　陈均燕：调研文献、实验模拟及数据处理工作、构思并撰写论文；范继林：技术指导；张琼：技术指导、审阅与校对；袁伟：提供仪器的相关数据。

参考文献

1　过惠平,吕汶辉,吕宁等.不同能量 X 和 γ 射线剂量等效性影响因素的蒙特卡罗方法研究[J].核技术,2014,37(01):24-28.
Guo Huiping, Lv Wenhui, Lv Ning, et al. Different energies X and γ Monte Carlo Method Study on Factors Influencing Radiation Dose Equivalence[J]. nuclear

technology,2014,37(01):24-28.
2 毛敏.LWD 随钻测井解释技术研究[D].东北石油大学,2010.
Mao Min Research on LWD logging interpretation technology [D]. Northeast University of Petroleum, 2010.
3 唐宇,余迎.随钻声波测井仪的最新发展:SonicScope475/Shock Wave LWD Sonic Tool[J].测井技术, 2011, 03(v.35;No.214):39-39.
Tang Yu, Yu Ying. The latest development of acoustic logging tools while drilling: SonicScope475/Shock Wave LWD Sonic Tool [J]. Logging Technology, 2011, 03 (v.35; No.214): 39-39.
4 Weller, Geoff, Griffiths, Roger, Stoller, Chris, and Francoise Allioli. "A new integrated LWD platform brings next-generation formation evaluation services." Paper presented at the SPWLA 46th Annual Logging Symposium, New Orleans, Louisiana, June 2005.
5 楚泽涵. 地球物理测井方法与原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
Chu Zehan Geophysical logging methods and principles [M] Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
6 侯爽.随钻方位密度测井方法基础研究[D].中国石油大学,2011.
Hou Shuang. Basic research on drilling directional density logging method [D]. China University of Petroleum, 2011.
7 刘之的. 随钻测井响应反演方法及应用研究[D]. 西南石油大学, 2006.
Liu Zhi. Research on the inversion method and application of logging response while drilling [D]. Southwest University of Petroleum, 2006.
8 张丽.随钻方位密度成像测井基础研究[D].中国石油大学（华东）,2013.
Zhang Li. Basic research on azimuthal density imaging logging while drilling [D]. China University of Petroleum (East China), 2013.
9 李强,林业青,余文钦.随钻岩性密度测量原理与算法分析[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(10):103-104+107.
Li Qiang, Forestry Qing, Yu Wenqin. Principle and Algorithm Analysis of Rock Density Measurement While Drilling [J]. China Petroleum and Chemical Standards and Quality, 2021,41 (10): 103-104+107.
10 Tittman J ,Wahl S J .THE PHYSICAL FOUNDATIONS OF FORMATION DENSITY LOGGING (GAMMA - GAMMA)[J].Geophysics,2012,30(2):284-294.